

文章编号: 1001—1749(2000)03—0245—05

地表大回线源在任意层状介质中产生磁场的计算

翁爱华, 李舟波, 王雪秋

(长春科技大学 地球探测与信息技术学院, 长春 130026)

摘要: 在地面核磁共振数值模拟中, 地下介质中任意一点处磁场的快速计算非常重要。作者针对水平层状介质, 推导出利用递推方法求得任意一层中电磁波的透射和反射系数的简单方法, 从而为精确、稳定地计算位于地表的大回线源在地下任意一点处产生的磁场创造了有利条件。

关键词: 地面核磁共振; 大回线源; 正演

中图分类号: P631.3⁺25 **文献标识码:** A

THE MAGNETIC FIELD COMPUTATION FOR LARGE LOOP SOURCE

WENGA i-hua, LI Zhou-bo, WANG Xue-qiu

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130026, China)

Abstract: It is very important to calculate the accurate magnetic fields rapidly in the surface NMR data simulation. An accurate and stable magnetic field computation method, which is based on the recursive relation of the reflection and transmission coefficients in either the same layer or the nearby layers, is developed for an arbitrary point in the layered earth due to the excitation of a large loop source over the layered ground.

Key words: surface NMR; large loop source; forward computation

0 前言

地面核磁共振方法在地下水勘探方面的有效性使得该方法受到地球物理工作者的关注, 进行了许多试验和应用研究^[1~4]。目前, 关于正演方法的理论研究工作主要针对比较特殊模型如导电半空间模型^[5,6]和在导电半空间插入特殊电性层的简单三层模型^[5]等。由于地面核磁共振的响应是与地下含水空间磁场分布有关的体积积分, 因此全空间磁场计算非常重要。采用上述简单模型计算量小, 地下条件合适时能取得较高的精度。但当模型复杂时利用简单模型无法求取地下任意一点处的比较精确的磁场值, 从而无法求取正确的地面核磁共振的模型响应。因此, 研究位于地表的大回线在比较复杂的任意层状介质中任意一点处产生的磁场, 对提高模型的解释精度非常有必要。

作者在本文中首先给出了位于地表的大回线源在地下任意一点处产生的磁场的表达式, 接着利用边界条件, 确定了同层表达式中待定系数之间以及相邻层待定系数之间的关系。从而由地表的透射系数求得任意一层中的待定系数, 进而可求得任意一层中任一点处的磁场。

1 理论推导

磁场表达式的计算是基于如图 1 的分层均匀各向同性无磁性地电模型。发射回线半径为 a , 位于地

表,其中通以谐变电流 $I = I_0 e^{-i\omega t}$ 。计算采用柱坐标系,坐标原点设在回线的中心, z 轴向下。

2 磁场表达式

大回线源在层状介质上方任意一点的磁场计算已经多有讨论^[8,9,10]。由于电磁场满足 Maxwell 方程,求解时引入辅助函数 F

$$\nabla^2 F - k^2 F = 0 \tag{1}$$

满足:

$$\begin{cases} F_i = F_{i+1} \\ \frac{\partial F_i}{\partial z} = \frac{\partial F_{i+1}}{\partial z} \end{cases} \Big|_{z = h_i} \tag{2}$$

磁场各分量表达式为

$$\begin{aligned} H_r &= \frac{\partial F}{\partial z} \\ H_z &= -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial F}{\partial r} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

求解式(1),得到

$$F_i = \frac{I_0 a}{2} \int_0^\infty \frac{J_1(\lambda a)}{\lambda} [a_i e^{-u_i z} + b_i e^{u_i z}] J_0(\lambda r) d\lambda \tag{4}$$

其中, F_i 是任意一层中的辅助函数; a_i 与 b_i 为各层中的待定系数。在空气中有 $a_0 = 1$, 在基底中 $b_N = 0$ 。利用边界条件,各待定系数满足如下的方程组,在地表

$$\begin{aligned} 1 + b_0 &= a_1 + b_1 \\ -\lambda + \lambda b_0 &= -u_1 a_1 + u_1 b_1 \end{aligned} \tag{5}$$

在基底顶面

$$\begin{aligned} a_N - 1 e^{-u_N \cdot 1} h_{N-1} + b_N - 1 e^{u_N \cdot 1} h_{N-1} &= a_N e^{-u_N h_{N-1}} \\ -u_N - 1 a_N - 1 e^{-u_N \cdot 1} h_{N-1} + u_N - 1 b_N - 1 e^{u_N \cdot 1} h_{N-1} &= -u_N a_N e^{-u_N h_{N-1}} \end{aligned} \tag{6}$$

在其它界面

$$\begin{aligned} a_i e^{-u_i h_i} + b_i e^{u_i h_i} &= a_{i+1} e^{-u_{i+1} h_i} + b_{i+1} e^{u_{i+1} h_i} \\ -u_i a_i e^{-u_i h_i} + u_i b_i e^{u_i h_i} &= -u_{i+1} a_{i+1} e^{-u_{i+1} h_i} + u_{i+1} b_{i+1} e^{u_{i+1} h_i} \end{aligned} \tag{7}$$

为了求得地下任意一点处的磁场,必须求解满足上述方程组的待定系数。从表达式(5)~(7)可见,当波数 λ 很大时,指数项的计算误差很大,同时矩阵方程的病态性很严重,给精确求解造成困难。

3 待定系数的求取

为了高精度求得上述方程中的未知系数,研究发现,各层中的待定系数 a_i 与 b_i 以及相邻层中待定系数 a_i 与 a_{i+1} 满足线性关系。由于地表处的待定系数 $a_0 = 1$ 已知,求得上述线性关系便可求得地下任意一层中的待定系数。略去推导过程,有具体公式如下:

$$a_0 = 1, b_0 = \frac{z^{(1)} - z_0}{z^{(1)} + z_0} \tag{8}$$

$$a_i = G_{i,i-1} a_{i-1} \tag{9}$$

$$b_i = f_i e^{-2u_i h_i} a_i \tag{10}$$

$$a_n = (1 + f_{N-1}) e^{(u_N - u_{N-1}) h_{N-1}} a_{N-1}, b_N = 0 \tag{11}$$

$$f_i = \frac{z^{(i+1)} - z_i}{z^{(i+1)} + z_i} \tag{12}$$

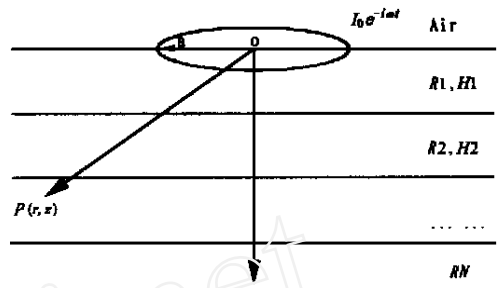


图1 大回线源层状地电模型

Fig 1 Model diagram

$$G_{i,i-1} = \frac{1 + f_{i-1}}{1 + f_i e^{-2u_i H_i}} e^{(u_i - u_{i-1})h_{i-1}} \tag{13}$$

$$z_i = -i\omega\mu_0/\mu_i \tag{14}$$

$$z^{(i)} = z_i \frac{z^{(i+1)} + z_i \text{th}(u_i H_i)}{z_i + z^{(i+1)} \text{th}(u_i H_i)} \tag{15}$$

$$z^{(N)} = z_N \tag{16}$$

4 数值积分

由公式(3), 对于第 i 层中某一点 $P(r, z)$ 处, 磁场的轴向分量 H_r 与垂向分量 H_z 可写成:

$$H_{ri}(r, z) = \frac{I_0 a}{2} \int_0^\infty [a_i e^{-u_i z} - b_i e^{u_i z}] u_i J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) d\lambda \tag{17}$$

$$H_{zi}(r, z) = \frac{I_0 a}{2} \int_0^\infty [a_i e^{-u_i z} + b_i e^{u_i z}] \lambda J_0(\lambda r) J_1(\lambda a) d\lambda \tag{18}$$

由 H_r 和 H_z 的表达式可见, 它们可统一表示为如下含有一阶 Bessel 函数的积分:

$$H(r, z, \omega) = \int_0^\infty f(\lambda, \omega, r, z) J_1(\lambda a) d\lambda \tag{19}$$

在回线中心处对上式采用快速 Hankel 变换进行计算。作者在文中采用 94 个滤波系数^[10]。

5 数值结果

为了检验采用本方法的计算精度, 我们首先用均匀半空间模型进行检验, 半空间电阻率为 $100\Omega\text{m}$ 。层状模型为四层, 每层的电阻率都设为 $100\Omega\text{m}$, 从而表现为均匀半空间模型。回线半径 50m , 位于地表。在回线中心处分别用均匀半空间解析计算公式与层状模型的递推公式计算了频率响应, 如图 2 所示。图中虚线为实部, 实线为虚部, 带十字的实、虚线为作者介绍的方法结果, 见图 2 所示。从图 2 可见, 两者完全一致, 并和 N abighian (1992)^[8] 结果完全一致。

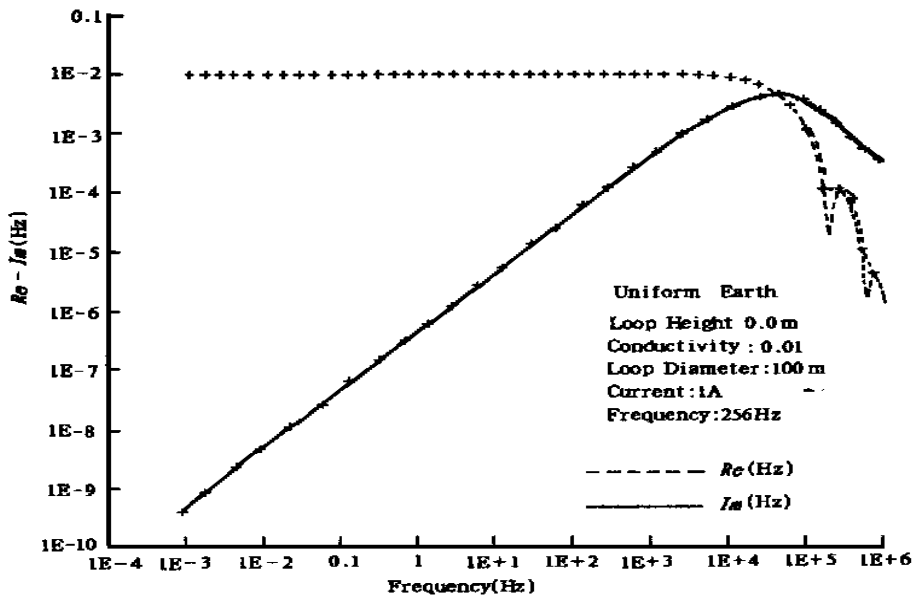


图 2 均匀半空间模型回线中心处 H_z 的频率响应

Fig 2 The frequency response of H_z at the center of large loop over the half space

图 3 给出了四层 HA -型模型在回线中心处用常规方法和递推方法求得的 H_z 频率响应。模型的各层电阻率分别为 $100, 10, 100, 1000\Omega\text{m}$, 基底之上各层厚度为 $50, 50, 100\text{m}$ 。从图中可见, 除了在曲线的中部一小段有小于 5% 的误差外, 其余频点响应完全重合。

由于在计算过程中假设模型没有导磁性, 故在地层界面处 H_z 应该连续。为此计算了在回线中心处当

频率为 256Hz 时, H_z 随深度的变化情况。图 4 给出的计算结果说明采用文中介绍的方法是正确的。

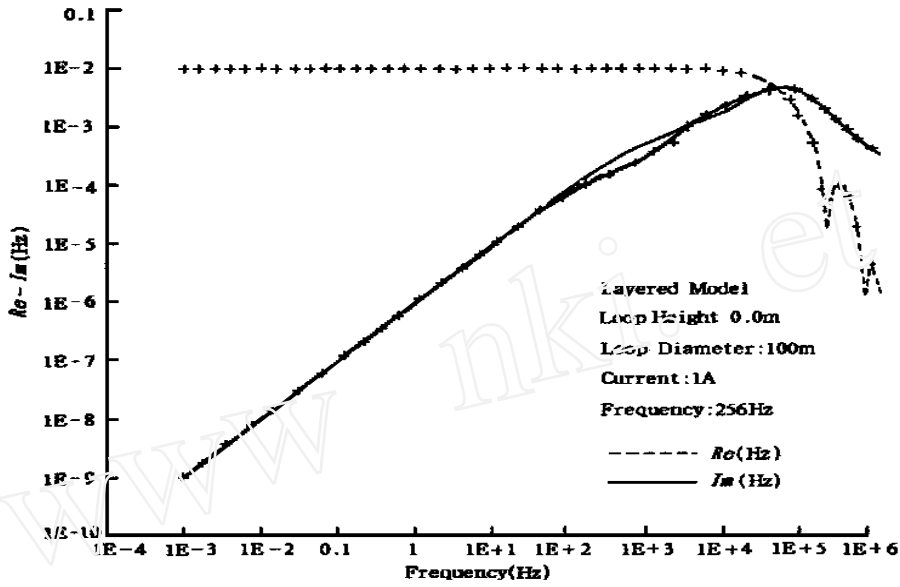


图 3 四层层状模型回线中心处 H_z 的频率响应

Fig 3 The frequency response of H_z at the center of large loop over the layered model

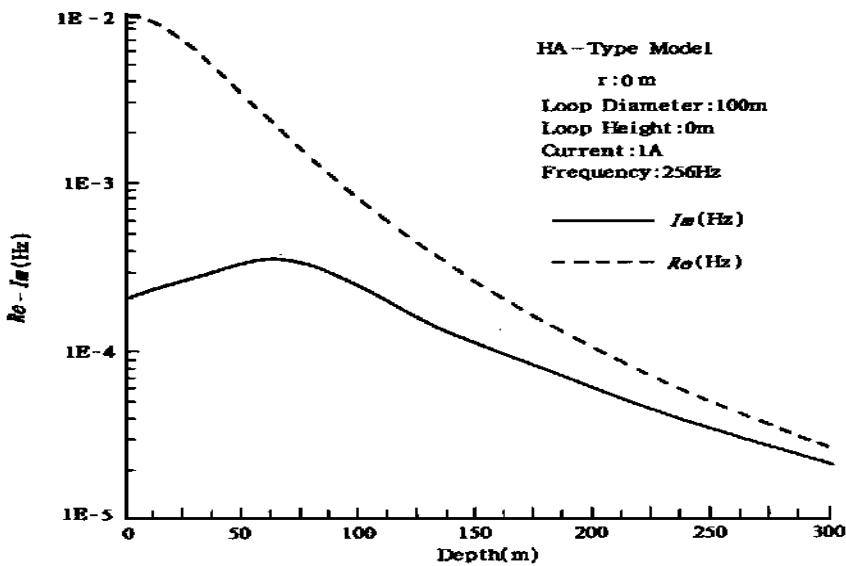


图 4 四层层状模型回线 H_z 随深度变化

Fig 4 Variation of H_z with depth at the center of the large loop located above the layered ground

5 结论

(1) 作者针对任意层状地电模型, 给出了地表大回线源在地下任意一点处产生的磁场表达式中待定系数快速、精确、稳定的计算方法。

(2) 利用均匀半空间和层状地电模型进行了数值模拟, 证明了文中所介绍的方法的有效性和实用性, 从而为对多层地电模型的地面核磁共振勘探进行数据模拟和解释创造了条件。

参考文献:

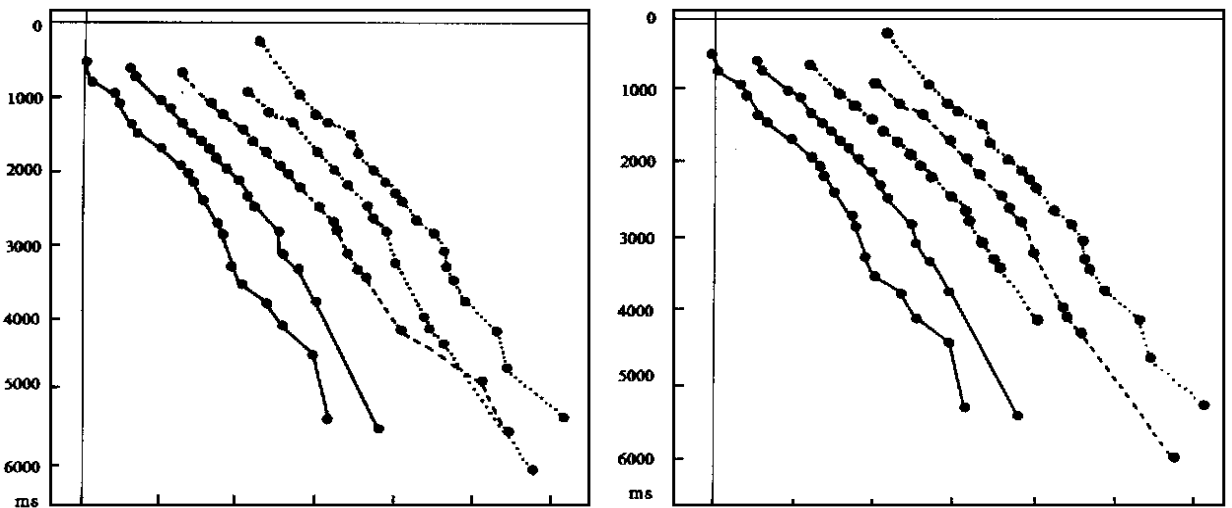
[1] Legchenko A V. Non-invasive MNR study of subsurface aquifers in France[J]. SEG65, 1995, 1(1): 364



- [2] Goldman M, Rabinovich B, Rabinovich M. Application of the integrated NMR-TDEM method in groundwater exploration in Israel [J]. Journal of Applied Geophysics, 1994, 31(1): 27.
- [3] Schirov M, Legchenko A, Creer G. A new direct non-invasive Groundwater detection technology for Australia [J]. Exploration Geophysics, 1991, 22(2): 333.
- [4] Filatov V V, Poletaeva N G. Geophysical NMR-Tomography study of the structure of water-bearing collectors [J]. Geology and Geophysics, 1998, 39(4): 524.
- [5] Shushakov O A, Legchenko A V. Calculation of underground water proton magnetic resonance signal with regard to conductivity [J]. Geology and Geophysics, 1994, 35(3): 130.
- [6] Trushkin D V, Shushakov O A, Legchenko A V. Surface NMR applied to an electroconductive medium [J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43(5): 623.
- [7] Shushakov O A, Legchenko A V. Groundwater proton magnetic resonance in the horizontally stratified media of different electrical conductivity [J]. Geology and Geophysics, 1994, 35(10): 140.
- [8] Nabighian, 赵经祥, 译. 电磁法勘探-理论卷 [M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [9] Patra H P, Mallick K. Geosounding principles-2: Time-varying geoelectric soundings [M]. Elsevier Scientific publishing, 1980.
- [10] 朴化荣. 电磁测深法原理 [M]. 北京: 地质出版社, 1990.

作者简介: 翁爱华(1971—), 男, 讲师, 已发表论文数篇, 主要从事电磁法勘探, 核磁电法探测。

(上接第 224 页)



(a) 剔除野值前的速度谱曲线

(b) 剔除野值后的速度谱曲线

(a) Velocity-spectrum curves before rejecting abnormal values

(b) Velocity-spectrum curves after rejecting abnormal values

图 1 速度谱曲线及剔除野值后的结果

Fig 1 Velocity-spectrum curves and its results after rejecting abnormal values

作者简介: 陈遵德(1956—), 男, 湖北公安人。1988年毕业于中国地质大学研究生院应用地球物理专业, 获硕士学位, 现为江汉石油学院物探系副教授, 长期从事地震勘探的教学与科研工作, 作为负责人和主要骨干完成国家自然科学基金等纵横向项目十多项, 出版专著一部, 在国内、外十多种学术刊物及国际国内学术会议上发表科技论文四十余篇, 目前为成都理工学院地球探测与信息技术专业在读博士研究生, 主要研究方向: 地震属性优化, 地震速度等。